

Batarya ve PV Sistemi İçeren Bir Mikro Şebekenin Gün Öncesi Enerji Yönetim Sistemi ile Optimum İşletilmesi

Optimum Operation of the Day-Ahead Energy Management System of Based Battery and PV system a Microgrid

Sezai POLAT¹, Emrah BIYIK², Hacer ŞEKERCİ ÖZTURA¹

¹Yaşar Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi
sezaipolat@gmail.com, hacar.sekercei@yasar.edu.tr

² Yaşar Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi
emrah.biyik@yasar.edu.tr

Özet

Yenilebilir enerji kaynaklarının kullanılması sadece enerjinin daha düşük maliyetli elde edilmesi değil aynı zamanda sistemin teknik kısıtları bakımından avantajlar sağlayabilmektedir. Bu çalışmada radyal bir dağıtım sistemi içerisine entegre edilmiş dört adet PV ve dört adet batarya sisteminin temel sisteme göre nasıl bir etkisinin olduğunu incelenmiştir. Oluşan sistemin etkisini görebilmek için sistemin matematiksel modeli oluşturulmuş, yük akışı lineer olmayan denklem takımı ile hesaplanmış, yirmi dört saatlik öngörü sistem bir optimizasyon problemi haline getirilerek, lineer olmayan çözücü yardımıyla çözülmüştür. Benzetim sonuçları; gerek hat kayıpları gerekse minimum maliyet amaçlanarak elde edilmiş ve temel sisteme göre iyileştirmenin PV ve bataryanın olduğu hibrit sistemde olduğu sonucu elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: mikro şebeke, yük akışı, gün öncesi, batarya, PV

Abstract

The use of renewable energy sources can provide not only lower cost of energy but also improvements in terms of the technical constraints of the system. In this study, the effect of four PV and four battery systems integrated into a radial distribution system compared to the basic system. In order to increase the effect of the system, the mathematical model of the system was created, the load flow was calculated with a nonlinear equation set, the 24-hour day-ahead system was turned into an optimization problem and solved with the help of a nonlinear solver. The simulation results were obtained with the aim of both line losses and minimum cost, and the hybrid system with the improvement PV and battery gave the best result compared to the basic system.

Keywords: microgrid, load flow, day-ahead, battery, PV

1. Giriş

Yenilebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonun giderek artması, enerji maliyetlerinin ve hat kayıplarının azaltılmasının sağlanmasının yanı sıra gerilim seviyelerinde iyileşmeler meydana getirebilmektedir[1]. Ancak bu avantajlarının aksine şebekeye olan verilen enerjinin belirli seviyelerin üstüne çıkması durumunda baralarda aşırı gerilim yükselmelerine yol açabilmektedir[2]. Sistemde gerekli teknik ve ekonomik iyileştirmeleri yapmak için gün öncesi enerji yönetim sistemi literatürde oldukça sık kullanılan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. [3]'de DC yük akışı hesabı kullanarak içeriden farklı dağıtık üretim kaynakları bulunan radyal sistemde enerji maliyetlerini azaltmayı amaçlayan bir gerçekleştirmişlerdir. [4]'deki çalışmada yazarlar, farklı bir yük kısı hesabı olan 'Dist Flow' yöntemini kullanarak yine radyal bir sistemde enerji maliyetini azaltmak amacıyla çeşitli analizler yapmışlardır. Dağıtık üretim kaynağı ve yükteki değişimler sebebiyle oluşan gerilim dalgalanmaları ve hat kayıplarını azaltmak amacıyla IEEE 33 test sistemin yeni bir yöntem denenmiştir [5]. [6]'da ise yine radyal sistemlerde mobil batarya sistemi kullanılarak maliyet iyileştirmesi amaçlayan bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada gün öncesi enerji yönetim sistemi ile gün öncesi tahminiyle elde edilen yük ve yenilenebilir enerji kaynaklarının miktarlarına göre, 24 saatlik zaman için hangi zaman diliminde şebekenin gerilim sınırlarını aşmadan en fazla enerji kazancı ve en düşük enerji kaybını amaçlayan bir optimizasyon modeli oluşturularak, çeşitli benzetim çalışmaları yapılmıştır.

2. Micro Şebeke Enerji Yönetim Sistemi

Şebekeye bağlı bir mikro şebekeye yapısının kullanıldığı bu çalışmada, içerisinde batarya ve fotovoltaik (PV) sistemler bulunan bir şebeke modelinin tüm yüklerin kesintisiz bir şekilde enerjisinin en düşük

maliyet ile sağlanması hedeflenmiştir. Bunu sağlamak için PV üretiminin yüksek olduğu anda şebekenin yenilebilir ile beslenmesi, hatta şebeke fiyatının yüksek olduğu saatler için önceden bataryaların PV'den doldurulması, gerekirse şebeke fiyatların düşük olduğu anda doldurulması sağlanarak, 24 saat için en düşük maliyetle enerji temin edilmesidir.

3. Yük Akışı Analizi

Genellikle dağıtım sistemlerinin R/X oranı yüksek olması sebebiyle, bilinen yük akış modellerlerinden olan Newton-Raphson, Gauss-Seidel ve Fast-Decoupled yöntemleri uygulanamazlar[7]. Uygulanması durumunda yeterli hassasiyette sonuç vermemesi ve Jakoben matrisin tersinin alınması uzun zaman almasından dolayı, literatürde farklı yük akışı hesaplama yöntemleri kullanılmaktadır[8]. Bunlardan en yaygın olanlar birisi direk yük akışı (Direct Load Flow (DLF)) yöntemidir[9]. Bu yöntem ile ileri yönde gerilim hesaplanarak, geri yönde ise akım hesaplanarak radyal sistemde bara gerilimleri ve hat akımları hesaplanabilmektedir.

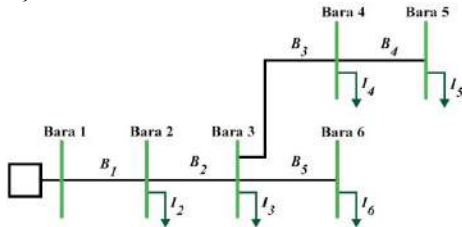
Radyal sistemler için önerile bu yöntemde, (bus injection to branch current (BIBC)) matrisi ve (branch-current to bus-voltage (BCBV)) matrisi oluşturularak hesaplamalar gerçekleştirilir. Bir dağıtım şebekesinde i barasındaki yükün görünür gücü eşitlik (1) ile hesaplanır.

$$S_i = P_i + jQ_i \quad i = 1 \dots \dots N. \quad (1)$$

k 'nıncı iterasyon sonunda baradan çekilen akım I_i^k ise

$$I_i^k = I_i^r(V_i^k) + jI_i^i(V_i^k) = \left(\frac{P_i + jQ_i}{V_i^k} \right)^* \quad (2)$$

Burada V_i^k bara gerilimi, S_i görünür güç, P_i aktif güç, Q_i reaktif güç, i bara numarası, I_i^r baradan çekilen akımın aktif bileşeni, I_i^i baradan çekilen akımın reaktif bileşenidir. Şekil 1'de gösterilen 6 baralı basit bir radyal dağıtım sisteminde, önerilen yük akışı yönteminin uygulanırsa, hesaplama aşağıda belirtilen aşamalarla gerçekleştirilir.



Şekil 1. 6 Baralı radyal dağıtım sistemi

Kirchhoff'un akımlar kanunu uygulayarak bara akımlarından (I), hat akımları (B) hesaplanır. Hat akımları;

$$\begin{aligned} B_1 &= I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \\ B_2 &= I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \\ B_3 &= I_4 + I_5 \\ B_4 &= I_5 \\ B_5 &= I_6 \end{aligned} \quad (3)$$

olarak elde edilir. Graf teorisinden faydalanılarak eşitlik (3)'den BIBC matrisi(eşitlik(4)) elde edilir[10].

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[B] = [BIBC] * [I] \quad (5)$$

Hat akımları ile bara gerilimleri arasındaki ilişki eşitlik(6)'da verilmiştir ;

$$\begin{aligned} V_2 &= V_1 - B_1 * Z_{12} \\ V_3 &= V_2 - B_2 * Z_{23} \\ V_4 &= V_3 - B_3 * Z_{34} \\ V_5 &= V_1 - B_1 * Z_{12} - B_2 * Z_{23} - B_3 * Z_{34} \end{aligned} \quad (6)$$

Şeklinde elde edilir. Benzer şekilde hat akımları cinsinde elde edilmek istenirse aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$[\Delta V] = [BCBV] * [B] \quad (8)$$

$$[\Delta V] = [BCBV] * [BIBC] * [I] \quad (9)$$

$$[\Delta V] = [DLF] * [I] \quad (10)$$

Elde edilen ΔV vektörü iteratif bir şekilde uygulanırsa, tüm baralardaki gerilimler aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$[\Delta V^{k+1}] = [DLF] * [I^k] \quad (11)$$

$$[V^{k+1}] = [V^0] + [\Delta V^{k+1}] \quad (12)$$

4. Mikro Şebekenin Modellenmesi

Mikro şebekeyi oluşturan batarya, PV ve diğer şebeke elemanları aşağıda belirtildiği gibi modellenmiştir.

4.1. Fotovoltaik sistem

Fotovoltaik(PV) diziler tarafından üretilen güç, üç bileşenin çarpılması sonucu elde edilir[11].

$$P_{pv} = \eta_{pv} * A_{pv} * I_{pv} \quad (13)$$

Burada P_{pv} ; PV üretilen güç (W), η_{pv} ; PV sistemin verimi (%), A_{pv} ; PV sistemin yüzey alanı (m^2), I_{pv} ; güneş ışınımı (W/m^2)'dir.

4.2. Batarya enerji depolama sistemi

Batarya enerji depolama sistemi, yenilebilir enerjinin rassal olmasından dolayı, enerjinin kesintisizliğinin sağlanmasının yanı sıra enerji maliyetinin düşürmek amacıyla, şebeke enerji fiyatının düşük olduğu zamanlarda depolama yaparak, enerji fiyatının yüksek olduğu zamanlarda, şebekeden enerji satın almak yerine depolanan enerjisi yüke aktarmakla görevlidir. Bataryadaki enerji dengesi eşitlik(14)'de verilmiştir.[12].

$$E_{Batt}(t) = E_{Batt}(t - \Delta t) - P_{Batt}(t) * \Delta t \quad (14)$$

Burada t anında bataryadaki enerji $E_{Batt}(t)$, $P_{Batt}(t)$ ise batarya tarafından çekilen ya da bataryaya verilen gücü

göstermektedir. Δt ise belirlenen zaman aralığıdır. Bataryadaki depolanan enerjinin durumu (State of Charge) $SoC(t)$ ise eşitlik (15)'te verilmiştir[12].

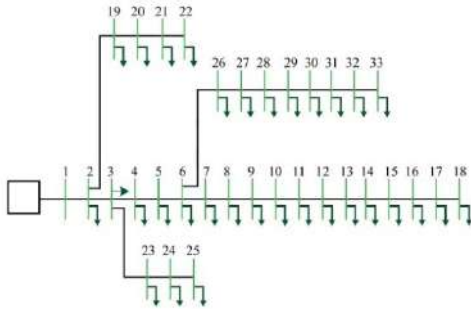
$$SoC(t) = SoC(t - \Delta t) - \frac{P_{Batt}(t) * \Delta t}{E_{nom}} \quad (15)$$

Burada E_{nom} ; bataryanın nominal kapasitesini, $P_{Batt}(t)$ ise bataryadan çekilen güç, yada bataryaya verilen gücü göstermektedir. Bataryadan çekilen güç pozitif, bataryaya verilen güç ise negatif değerlidir.

4.3. Dağıtım sistemi

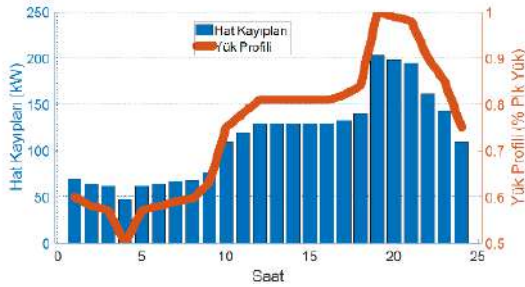
Bu çalışmada

Şekil 2'de gösterilen IEEE 33 baralı dengeli test sistemi kullanılarak analizler yapılmıştır.

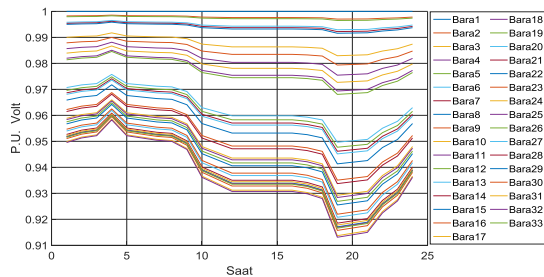


Şekil 2. IEEE 33 baralı dengeli test sistemi

Literatürdeki çeşitli çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile önerilen yük akış yönteminin elde edilen sonuçların tutarlı olduğu tespit edilmiştir[13]. Daha sonra önerilen yük akış yöntemi ile 24 saat için aşağıda verilen Şekil 3'de değişken yük profili uygulanmış ve temel durum elde edilmiştir[14], [15].



Şekil 3. 24 saatlik yük profili ve temel durum hat kayıpları değişimi



Şekil 4. Temel durumda saatlik bara gerilimleri

Bir günlük toplam hat kayıplarına ait toplam enerji ise 2.733,91 kWh olarak hesaplanmıştır. Şekil 3'de verilen değişken yük profili test sistemine uygulandığında,

sistemde meydana gelen bara gerilim değişimleri Şekil 4'de görülmektedir.

5. Önerilen Sistem Yapısı

Bahsi geçen temel sistemin etkin bir şekilde kullanılabilmesi için, sistem içerisine PV ve batarya eklenmesi faydalı olacaktır. Mikro şebeke içerisine PV ve bataryanın eklenmesiyle gerek hat kayıpları gerekse sistemin şebekeden aldığı enerjiyi azalacağından, mikro şebekenin enerji maliyetlerinde düşüş olacaktır. Bu sebeple çalışmanın amacına uygun bir sistem önerisi getirilmiştir. Tasarlanan sistem için matematiksel model ile hat kayıplarının azaltılması ve işletme maliyetlerinin en aza indirilmesi amaçlanmıştır.

5.1. Matematiksel model ve amaç fonksiyonu

Tasarlanan sistem için eşitlik(16)'da verilen matematiksel model ile hat kayıplarının azaltılması ve işletme maliyetlerinin en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Hem sistemin şebekeden hangi zamanda ne kadar alacağı veya satacağı enerjiyi en düşük maliyetle belirlemek hem de, bataryaların ömür maliyetlerini de göz önünde bulunduracak ayrıca hat kayıplarını da en aza indirecek bir amaç fonksiyonu oluşturulmuştur.

$$Min = C_{\text{şebeke}}^t + C_{\text{Batarya}}^t + C_{\text{Hat Kayıp}}^t \quad (16)$$

$$C_{\text{şebeke}}^t = \sum_{t=0}^N (P_{\text{şebeke alıs}}^t * \lambda_{\text{Alıs Fiyatı}}(t) - P_{\text{şebeke satıs}}^t * \lambda_{\text{satıs fiyatı}}(t)) * \Delta t \quad (17)$$

$$C_{\text{Batarya}}^t = \sum_{t=0}^N (P_{\text{Bat.şarj}}^t * C_{\text{şarj maliyet}} + P_{\text{Bat.deşarj}}^t * C_{\text{deşarj maliyet}}) * \Delta t \quad (18)$$

$$C_{\text{Hat Kayıp}}^t = \sum_{t=0}^N r_{ij} * I_{ij}^2 * \Delta t \quad (19)$$

Burada; $C_{\text{şebeke}}^t$ şebeke maliyeti(\$), C_{Batarya}^t batarya enerji maliyeti(\$), $C_{\text{Hat Kayıp}}^t$ (kWh), $P_{\text{şebeke alıs}}^t$ şebekeden çekilen güç(kW), $P_{\text{şebeke satıs}}^t$ şebekeye verilen güç(kW), $\lambda_{\text{Alıs Fiyatı}}(t)$ anında şebekeden alış fiyatı(\$/kWh), $\lambda_{\text{satıs fiyatı}}(t)$ anında şebekeye satış fiyatı(\$/kWh), $P_{\text{Bat.şarj}}^t$ bataryaya verilen güç(kW), $P_{\text{Bat.deşarj}}^t$ bataryadan çekilen güç(kW), $C_{\text{şarj maliyet}}$ bataryanın şarj ömür maliyeti(\$/kWh), $C_{\text{deşarj maliyet}}$ bataryanındeşarj ömür maliyeti(\$/kWh), r_{ij} (i) barası ile (j) barası arasındaki hattın direnci(Ω), I_{ij} (i) barası ile (j) barası arasında geçen akım(A), Δt belirlenen zaman aralığı(saat), N ise optimizasyonun ufuk sayısıdır (bu çalışma için 24 alınmıştır).

5.2. Sistem kısıtları

Enerjinin sürekliliğinin sağlanması için, analizi yapılan sistem her zaman aralığında eşitlik(20)'de verilen güç dengesi denkleminin sağlanıyor olması gereklidir.

$$P_{Şebeke_{alış}}^t - P_{Şebeke_{satış}}^t - P_{Bat_{şarj}}^t + P_{Bat_{deşarj}}^t + P_{PV}^t = P_{Hat_{Kayıp}}^t + P_{yük}^t \quad (20)$$

Burada dikkat edilmesi gereken husus, hat kayıpları sistem yüküne ilave yük olarak modellenmiş ve batarya şarj modunda yük gibi davranacağından,deşarj modunda ise tıpkı PV gibi enerji kaynağı olarak modellenmiştir. Bataryanın şarj vedeşarj durumlarındaki verimleri farklı ve buna bağlı olarak maliyetlerinin farklı olması sebebiyle,deşarj ve şarj güçleri ayrı değişkenler olarak modellenmiştir.

5.3. Batarya kısıtları

Sistemde kullanılan batarya enerji depolama sistemlerinin aşağıda belirtilen eşitlik(21)'de şekilde enerjisini koruyor olması gereklidir[4].

$$SoC_{min} \leq SoC(t) \leq SoC_{max} \quad (21)$$

Ayrıca batarya tarafından sisteme verilecek ya da sistemden çekilecek gücün de belirtilen limitler içerisinde olması gereklidir.

$$P_{bat_{min.}} \leq P_{bat}(t) \leq P_{bat_{mak.}} \quad (22)$$

5.4. Gerilim kısıtları

Sistem güvenliği açısından her bir baradaki gerilim eşitlik(23)'deki gibi belirli sınırlar içerisinde kalmalıdır.

$$V_n^{alt\ limit} \leq V_{n,t} \leq V_n^{üst\ limit} \quad (23)$$

6. Çözüm Yöntemi

Oluşturulan matematiksel model ile, gün öncesi belirlenen yük ve PV miktarına göre, enerji yönetim siste tarafından en düşük hat kaybı ve en düşük maliyeti amaçlayan bir optimizasyon problemi oluşturulmuştur. Burada yük akışının bir lineer olmayan denklem takımı olmasından dolayı, optimizasyon problemi MATLAB içerisinde yer alan 'fmincon' denklem çözücüsü kullanılmıştır. Lineer olmayan programlamanın temel yapısı şu şekildedir;

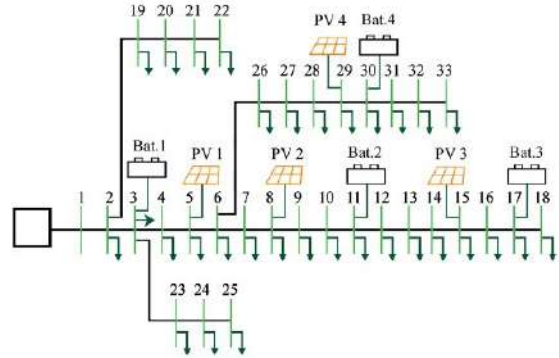
$$\min_x f(x) \quad (24)$$

$$\text{kısıtlar} \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ ceq(x) \leq 0 \\ A * x \leq b \\ A_{eq} * x = b_{eq} \\ altlimit_b \leq x \leq ustlimit_b \end{cases} \quad (25)$$

7. Benzetim Çalışmaları ve Sonuçlar

4. Bölümde yer alan IEEE 33 test sisteminin içerisinde aşağıda belirtilen baralara [16]'de belirlenen PV ve bataryaların eklenmesiyle elde edilmiş modifiye test sistemi Şekil 5'da gösterilmiştir. Batarya ve PV'lerin bağlantı noktalarının belirlenmesi, voltaj kararlılık indeksi ve güç kayıpları indeksi gibi çeşitli hesaplama yöntemleri ile belirlenmektedir. Çalışmada kullanılan ekipmanların hangi baralara bağlanacağı başka bir çalışmanın konusu olup, bu çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır.

Şekil 6'de ve Tablo 1'de gösterilen farklı güçlere sahip PV ve batarya sistemini 4.bölümde yer alan temel duruma ilave edilerek üç durum analizi gerçekleştirilmiştir.

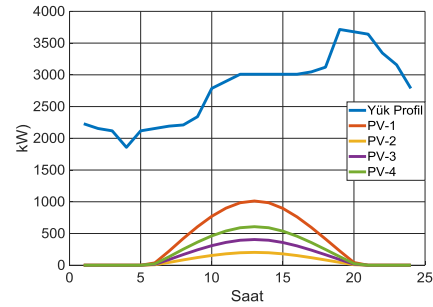


Şekil 5. Modifiye edilmiş test sistemi[16]

Durum-1: Sadece PV'lerin ilave edildiği durum.

Durum-2: Sadece bataryaların ilave edildiği durum.

Durum-3: PV ve Bataryaların birlikte ilave edildiği durum.



Şekil 6. Test sistemine uygulanan yük ve PV güçleri

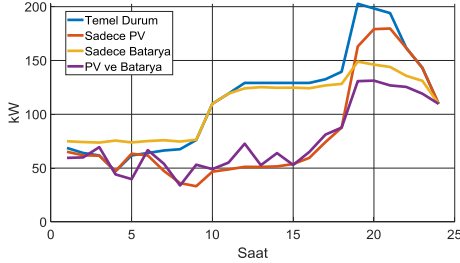
Tablo 1. Ekipman parametreleri[16]

Ekipman	Bağlantı noktası	Kapasitesi (MW)	Enerjisi (MWh)
Batarya-1	3	2	2
Batarya-2	11	1	1
Batarya-3	17	1	1
Batarya-4	30	2	2
PV-1	5	1	----
PV-2	8	0.2	----
PV-3	15	0.4	----
PV-4	29	0.6	----

Durum-1'de belirtilen sadece PV'lerin ilave edildiği vaka analizinde, bir günlük toplam hat kayıplarına ait toplam enerji ise 1.938,34 kWh olarak hesaplanmıştır. Böylece temel duruma göre hat kayıplarında yaklaşık %29'luk bir düşüş meydana gelmiştir. Durum-2'de ise sadece bataryaların ilave edildiği sistemde, amaç fonksiyonun hat kayıplarının minimize edildiği bir benzetim gerçekleştirilmiştir. Burada elde edilen sonuçta ise bir günlük toplam hat kayıplarına ait toplam enerji ise 2.597,05 kWh olarak hesaplanmış ve buda yaklaşık %5'lik bir azalma sağlamıştır. Son durum olan durum-3'te, hem PV hem de bataryanın mikro şebekeye edilmesiyle, sistemin hat kayıplarının toplamı ise

1.804,15 kWh elde edilerek %34'lük azalma sağlanmıştır.

Amaç fonksiyonu, sadece hat kayıplarının minimize edildiği tüm durumlar için gerçekleştirilen benzetimlerden elde edilen sonuçların karşılaştırmalarının yapıldığı 24 saatlik hat kayıpları değişimi Şekil 7'de görülmektedir.

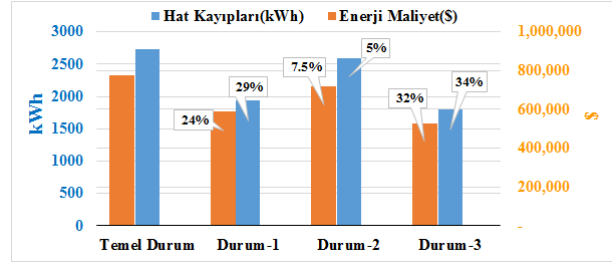


Şekil 7. Toplam hat kayıplarının zaman göre değişimi

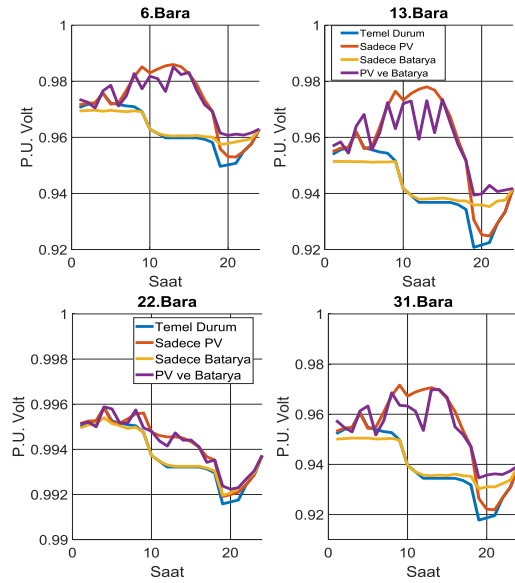
Yukardaki grafikten de görüleceği üzere, hat kayıpları bakımından temel durum en yüksek seviyede olup, sadece batarya eklenmesiyle iyileşme yani düşüş gözlenmiştir. Sadece PV eklenmesi ile daha iyi performans sağlanmıştır. Hem PV hem de bataryanın beraber eklenmesi ile en iyi durum gerçekleşmiş olup, 24 saatlik periyotta temel duruma göre yaklaşık %34 lük bir azalma sağlanmıştır. Yapılan benzetim çalışmalarından elde edilen bazı baralardaki gerilim seviyelerindeki değişim Şekil 9'dur. Gerilim seviyelerindeki değişimlerdeki ortak özellik, batarya kullanımında gerilim belirli bir seviyenin altına inmesine ve yükselmesine engel olması, böylece yükü sağlayacak enerji bataryadan ve sağlanıp, fazla üretim sonucu oluşabilecek aşırı gerilim yükselmesine izin vermemesidir. Böylece hat kayıplarında azalma sağlayabilmektedir. Şebekeden alınan enerjinin gün öncesi piyasa fiyatına ait saatlik değişim Şekil 10'da gösterilmiştir. Puant saatlerde fiyatın arttığı, diğer saatlerde ise enerji fiyatının daha düşük olduğu görülmektedir. Buna karşın şebekeye satılan enerji fiyatı ise sabit olarak kabul edilip 5 \$/kWh olarak hesaplanarak, benzer bir şekilde amaç fonksiyonun sadece enerji maliyetini minimize etmek üzere tekrar benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Burada ilave maliyet olarak bataryanın ekonomik ömrünün belirli bir maliyeti olması sebebiyle, batarya enerji depolama sisteminin enerjisi depolarken yani şarj modunda iken ve enerjisi boşaltırken diğer bir adıyla deşarj modunda iken belirli bir maliyet oluşturmasıdır. Bu maliyetler sistemin enerji maliyetlerini oluşturan bileşenlerden birisidir. Şekil 8'de 24 saat için elde edilmiş toplam enerji ve maliyetlerinin karşılaştırılmaları gösterilmiştir.

Herhangi bir ekipmanın eklenmediği temel durumda, Şekil 10'da gösterilen gün öncesi fiyat tarifesinin uygulandığı temel durumda enerji tedarikçisine ödenecek enerji bedeli 777.812(\$) olarak hesaplanmıştır. Sisteme 4 adet PV sistemin eklendiği durum-1'de enerjinin büyük bir kısmı PV'den üretildiği için satın alınan enerji azalmış, hatta şebekeye satıştan

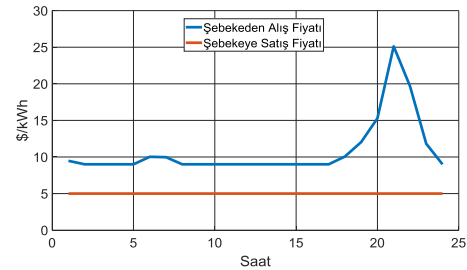
gelir elde edilip, enerji maliyeti oldukça azalarak 591.119(\$) seviyesine inmiştir.



Şekil 8. Enerji Miktarları ve Maliyetlerinin Karşılaştırılması



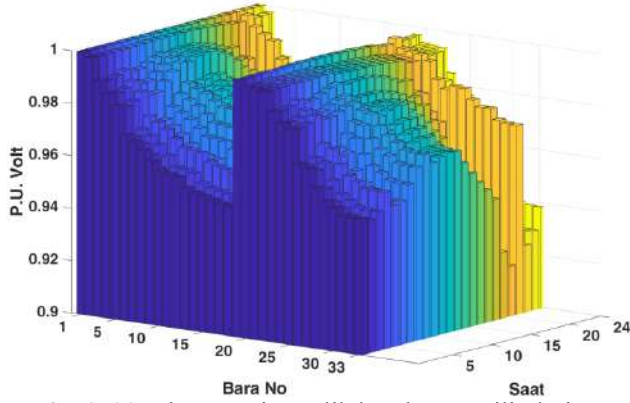
Şekil 9. Farklı Durumlara göre elde edilen bara gerilimleri



Şekil 10. Şebekeden enerji alış ve satış fiyatı

Durum-2'de ise herhangi üretim kaynağı bağlanmadan sadece enerjinin düşük fiyatlı olduğu durumda enerji depolayıp, yüksek fiyatlı olduğu anlarda yükün şebeke yerine bataryadan karşılanması durumunda ise 749.161(\$)'lik bir enerji maliyeti hesaplanmıştır. Durum-3'te ise hem batarya hem PV'nin bağlı olduğu vaka çalışmasında ise 529.961(\$)'lik bir maliyet ile en düşük maliyet elde edilmiştir. Benzer şekilde belirlenen gün için dağıtım hatlarından oluşan kayıpların PV eklenmesiyle yani tüketime yakın noktada üretim olmasıyla %24'lük bir azalma sağlandığı, buna ilave olarak bataryaların eklenmesiyle optimizasyon sonucu belirlenen saatlerde, yüklerin şebekeden almak yerine bataryadan beslenmesiyle %32 civarında düşüş elde

edilmiştir. Şekil 11’de yer alan grafikte durum-3 olarak analizi yapılmış olan hem PV hem de bataryanın yer aldığı maliyet optimizasyonu yapılmış sistemde, saatlere göre tüm baralardaki gerilim seviyeleri gösterilmiştir. Güneşlenmenin en yüksek seviyede olduğu öğlen saatlerinde gerilimleri yükselmiş olup, salınım barasından uzaklaştıkça gerilimler düşmektedir. 18. barada gerilim en düşük seviyeye inmekte ilen, salınım barasına yakın olan 19. barada ise neredeyse salınım barasının gerilimine yakın bir gerilim görülmektedir.



Şekil 11. Bir güne ait saatlik baraların gerilimleri

8. Sonuç

Bu çalışmada radyal bir dağıtım sistemi içerisine entegre edilmiş 4 adet PV ve 4 adet batarya sisteminin temel sisteme göre nasıl bir etkisinin olduğunu incelenmiştir. Sistemin etkisini artırmak için sistemin matematiksel modeli oluşturulmuş, yük akışı lineer olmayan denklem takımı ile hesaplanmış, 24 saatlik öngörü sistem bir optimizasyon problemi haline getirilerek, lineer olmayan çözücü yardımıyla çözülmüştür. Burada gün öncesi yük, güneşlenme ve elektrik piyasa fiyatı matematiksel model içesine eklenerek çözüm elde edilmiştir. Benzetim sonuçları gerek hat kayıpları gerekse minimum maliyet amaçlanarak elde edilmiş ve temel sisteme göre iyileştirme PV ve bataryanın olduğu hibrit sistem en iyi sonucu vermiştir. Hat kayıpları bakımından temel sisteme göre %34 ‘lük bir düşüş sağlanmış olup, enerji maliyetinde ise %32’lik bir azalma sağlanmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken önemli husus sisteme sadece batarya eklenmesinin gerek hat kayıpları gerekse enerji maliyeti açısından diğer durumlara göre çok daha az bir iyileştirme sağladığıdır. Bu çalışma ise enerji maliyeti ve hat kayıpları analizler yapılmış olup, hem yatırımcılar hem de dağıtım şirketleri açısından bir fikir vermesi açısından faydalı olacağı düşünüldüğü için hazırlanmıştır. Analizi yapılan bu test sistemi gelecek çalışmalarda geliştirilerek örneğin ilave yeni hatlar, baralara kapasitör eklenmesi ya da dizel jeneratör ve rüzgâr türbini eklenerek geliştirilebilir.

9. Kaynaklar

[1] A. Maknouninejad ve Z. Qu, “Realizing Unified Microgrid Voltage Profile and Loss Minimization: A Cooperative Distributed Optimization and Control Approach”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, c. 5, sayı 4, ss. 1621–1630, Tem. 2014.

[2] S. Rajamand, M. Shafie-khah, ve J. P. S. Catalão, “Energy storage systems implementation and photovoltaic output prediction for cost minimization of a Microgrid”, *Electric Power Systems Research*, c. 202, s. 107596, Oca. 2022.

[3] M. Rahimi, F. J. Ardakani, O. Olatujoye, ve A. J. Ardakani, “Two-stage interval scheduling of virtual power plant in day-ahead and real-time markets considering compressed air energy storage wind turbine”, *Journal of Energy Storage*, c. 45, s. 103599, Oca. 2022.

[4] B. V. S. Vardhan, M. Khedkar, ve I. Srivastava, “Effective energy management and cost effective day ahead scheduling for distribution system with dynamic market participants”, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, c. 31, s. 100706, Eyl. 2022.

[5] G. Huang, H. Wu, Z. Feng, Y. Ding, ve J. Wang, “Day-ahead reactive-voltage optimization for active distribution network with energy storage”, içinde *2021 3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEECT)*, 2021, ss. 170–174.

[6] X. Sun, J. Qiu, Y. Yi, ve Y. Tao, “Cost-Effective Coordinated Voltage Control in Active Distribution Networks With Photovoltaics and Mobile Energy Storage Systems”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, c. 13, sayı 1, ss. 501–513, Oca. 2022.

[7] F. Hameed, M. Al Hosani, ve H. H. Zeineldin, “A Modified Backward/Forward Sweep Load Flow Method for Islanded Radial Microgrids”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, c. 10, sayı 1, ss. 910–918, Oca. 2019.

[8] Jen-Hao Teng, “A direct approach for distribution system load flow solutions”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, c. 18, sayı 3, ss. 882–887, Tem. 2003.

[9] T. Thakur ve J. Dhiman, “A New Approach to Load Flow Solutions for Radial Distribution System”, içinde *2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2006, ss. 1–6.

[10] S. Huang ve V. Dinavahi, “Fast distribution network reconfiguration with graph theory”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, c. 12, sayı 13, ss. 3286–3295, Tem. 2018.

[11] M. R. Basir Khan, R. Jidin, ve J. Pasupuleti, “Multi-agent based distributed control architecture for microgrid energy management and optimization”, *Energy Conversion and Management*, c. 112, ss. 288–307, Mar. 2016.

[12] S. Cao, H. Zhang, K. Cao, M. Chen, Y. Wu, ve S. Zhou, “Day-Ahead Economic Optimal Dispatch of Microgrid Cluster Considering Shared Energy Storage System and P2P Transaction”, *Frontiers in Energy Research*, c. 9, Nis. 2021.

[13] V. Vita, “Development of a Decision-Making Algorithm for the Optimum Size and Placement of Distributed Generation Units in Distribution Networks”, *Energies*, c. 10, sayı 9, s. 1433, Eyl. 2017.

[14] S. H. Dolatabadi, M. Ghorbanian, P. Siano, ve N. D. Hatziargyriou, “An Enhanced IEEE 33 Bus Benchmark Test System for Distribution System Studies”, *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 36, sayı 3, ss. 2565–2572, May. 2021.

[15] T. Tewari, A. Mohapatra, ve S. Anand, “Coordinated Control of OLTC and Energy Storage for Voltage Regulation in Distribution Network With High PV Penetration”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, c. 12, sayı 1, ss. 262–272, Oca. 2021.

[16] X. Li, L. Wang, N. Yan, ve R. Ma, “Cooperative Dispatch of Distributed Energy Storage in Distribution Network With PV Generation Systems”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, c. 31, sayı 8, ss. 1–4, Kas. 2021.